

国产 600 MW 机组超临界直流锅炉吹管工艺的研究

高绥强¹, 黄 磊¹, 万小燕²

(1. 江苏省电力试验研究院锅炉所, 江苏 南京 210036; 2 南京东大金智电气自动化有限公司, 江苏 南京 210009)

摘 要: 分析比较了目前国内外主要的两种锅炉吹管工艺——降压吹管法和稳压吹管法的优缺点。在我国首台使用锅炉水泵启动系统的 600 MW 超临界直流锅炉上, 通过试验和计算, 研究了稳压吹管的可行性, 设计了稳压吹管工艺流程, 探讨了吹管过程中的注意事项, 为其它各型超临界锅炉调试和运行提供了很好的借鉴。

关 键 词: 超临界; 锅炉水循环泵; 直流锅炉; 稳压; 蒸汽吹管
中图分类号: TK229 文献标识码: B

1 前 言

锅炉蒸汽吹管是新建机组投运前的一项重要工序, 其目的是为了清除在制造、运输过程中留在过热器、再热器系统及管道中的各种杂物, 防止机组运行中过热器、再热器爆管和汽机通流部分损伤, 提高机组运行的安全性。国内外目前主要有两种电站锅炉吹管工艺, 即降压蒸汽吹管法和稳压蒸汽吹管法。传统的降压蒸汽吹管技术在我国已经基本成熟, 而稳压蒸汽吹管技术, 尤其是超临界直流锅炉的稳压吹管技术还在探索阶段, 而对于配锅炉水循环泵启动系统的超临界直流锅炉, 目前还没有使用稳压吹管的成功实例和经验。本文着重对配锅炉水循环泵启动系统的 HG1952/25.4-YM1 型超临界直流锅炉的吹管工艺和流程进行了研究, 并对吹管过程中的注意事项进行了探讨。

2 蒸汽吹管原理

为了保证蒸汽吹管的有效性, 吹管时被吹扫表面所受的作用力必须大于锅炉最大连续出力(BMCR)下蒸汽对管道表面的作用力。吹管系数 DF 被定义为吹扫工况和 BMCR 工况下两个作用力之比, 因此 DF 必须大于 1, 并且 DF 值越大, 吹管效果越好。它的计算公式为:

$$DF = \frac{W_{\text{purge}}^2 \times V_{\text{purge}}}{W_{\text{MCR}}^2 \times V_{\text{MCR}}} \quad (1)$$

式中: W —质量流量, kg/s; V —比容, m^3/kg ; purge—吹扫负荷; MCR—最大连续负荷。

3 两种吹管工艺的比较与选择

3.1 两种工艺的特点

降压蒸汽吹管是指锅炉事先维持一个较高的吹管压力, 然后迅速全开临时吹管门, 使得锅炉压力迅速下降, 蒸发量瞬间骤增, 从而实现对锅炉受热面的吹扫; 稳压蒸汽吹管是在吹管过程中始终维持相对恒定的系统压力, 它是一个相对稳态的过程, 在此过程中锅炉维持输入和输出之间的能量平衡以及给水量和蒸发量之间的质量平衡。

降压吹管法具有系统布置简单、吹管过程易于控制、吹管所需投入的系统少、操作相对简单等优点, 并且它能够保证在吹管期间的有效时间内过热器各处吹管系数 DF 大于 1; 与降压吹管法相比, 稳压吹管法在操作控制、相关支持系统的投入数量、临吹管路的管材要求、系统布置等方面都比降压吹管法要求要高得多。但是, 稳压吹管法有如下优点:

- (1) 保证锅炉蒸汽系统各处吹管系数大于 1。
- (2) 每次吹管可维持较长时间, 减少了完成锅炉吹管所需要的次数。

(3) 锅炉的压力基本不变, 汽温变化率和变化幅度小, 对锅炉厚壁承压部件带来的热应力较小。

3.2 降压吹管分析

三井巴布科克能源公司专家对 HG1952/25.4-YM1 型锅炉的推荐吹管工艺为降压吹管法。然而, 由于该型锅炉采用的是锅炉水循环泵启动系统, 与同等级的汽包锅炉相比, 它的热容量较小, 蓄热能力较差, 若采用降压吹管方法, 必须严格按照每次降压

吹管前锅炉熄火并停运锅炉水循环泵的操作程序进行, 否则锅炉汽水分离器的压力以及水位变化将对锅炉水循环泵及锅炉水动力的安全造成严重威胁。锅炉熄火降压吹管意味着锅炉的吹管初始压力必须足够高, 才能够保证降压吹管期间 DF 冲管系数大

于 1 的有效时间。在临冲门开启时间 30 s, 关闭时间 30 s, 分离器初始压力为 8.5 MPa, 终止压力为 4.69 MPa 时的工况下, 根据锅炉热力平衡和流量平衡, 计算出了该型锅炉部分受热面吹管参数随临冲门开关时间变化的情况, 如表 1 所示。

表 1 锅炉降压吹管参数

临冲门 动作的 时间/s	DF 吹管系数						锅炉主 蒸汽管	流量 / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	温降 / $^{\circ}\text{C}$
	低过进 口集箱	低过出 口集箱	屏过进 口集箱	屏过出 口集箱	未过进 口集箱	未过出 口集箱			
5	1.92	1.63	1.67	1.27	1.29	0.94	1.15	431	1.6
15	2.57	2.21	2.29	1.86	1.92	1.44	1.79	456	9
25	2.32	1.99	2.06	1.67	1.73	1.33	1.61	406	16.5
30	2.2	1.89	1.96	1.59	1.64	1.23	1.52	383	20
45	1.86	1.61	1.67	1.35	1.39	1.05	1.3	322	32
60	—	—	—	—	—	—	—	0	39

从表 1 中看出, 即使将锅炉的分离器初始压力提高到 8.5 MPa, 当采用降压吹扫法时, 锅炉部分吹扫受热面的有效吹扫时间也就仅有 30 s 左右。另外, 工作电压为 6000 V 的电动机冷态连续启停不能超过 3 次, 热态连续启停不能超过 2 次, 这将使得每天锅炉降压吹管次数受到了严格的限制, 从而造成整个机组的交付时间延长至少半个月以上。

3.3 稳压吹管分析

稳压吹管是一个锅炉输入能量和输出能量以及锅炉给水量和蒸发量之间的平衡过程, 它对锅炉启动分离器水位、厚壁承压部件的温度交变应力、锅炉水冷壁水循环、锅炉水启动循环泵的扰动要小得多。但是超临界直流锅炉要进行稳压吹管存在以下两个

问题, 首先, 实现稳压吹管的条件要比降压吹管要苛刻地多, 需要严密的参数计算和各方的协调合作; 其次, 锅炉稳压吹管期间在特定吹扫蒸汽动量下, 给水温度的高低直接决定了锅炉热负荷的大小和主再热汽温的高低等。锅炉吹管期间提高给水温度的唯一手段就是利用启动锅炉或厂母辅汽通过除氧器加热, 因此给水温度将远低于锅炉正常运行时该负荷下的设计温度。恰当的给水流量和给水温度是锅炉稳压吹管成功的必要条件, 我们在给水流量为 585 t/h、给水温度为 50 $^{\circ}\text{C}$ 、启动分离器压力为 6 MPa 的工况下, 对锅炉一次汽各受热面压力、温度、压降、减温水量等热力参数进行了分析计算, 结果如表 2 所示。

表 2 锅炉稳压吹管热力计算结果

数值	数值
锅炉吹管热负荷与锅炉 BMCR 热负荷之比/ %	48.9
锅炉 BMCR 工况过热器系统减温水量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	117
锅炉 BMCR 工况过热器系统设计压降/MPa	1.9
给水流量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	585
主蒸汽流量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	660
省煤器入口温度/ $^{\circ}\text{C}$	50
省煤器进出口给水温升/ $^{\circ}\text{C}$	53
省煤器压进出口给水压降/ MPa	0.081
炉膛水冷壁进出口水温升/ $^{\circ}\text{C}$	173
炉膛水冷壁进出口水压降/ MPa	0.36
启动分离器压力/ MPa	6
二级减温水压差/ MPa	2.62
顶棚过热器与低温过热器温蒸汽进出口温升/ $^{\circ}\text{C}$	47
顶棚过热器与低温过热器温蒸汽进出口压降/MPa	1.04
屏式过热器蒸汽进出口温升/ $^{\circ}\text{C}$	99.4
屏式过热器蒸汽进出口压降/MPa	1.13
末级过热器蒸汽进出口温升/ $^{\circ}\text{C}$	60
末级过热器蒸汽进出口压降/MPa	0.83
末级过热器出口温度/ $^{\circ}\text{C}$	450
过热器系统进出口蒸汽压降/MPa	3
一级减温水流量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	59
一级减温水压差/ MPa	1.49
二级减温水流量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	14.8

从表 2 中看出, 在该工况下锅炉末级过热器的出口温度为 450 °C, 符合过热蒸汽出口温度控制要求。锅炉减温水的投用量 74 t/h 小于锅炉的设计减温水量 117 t/h, 减温水的用量也在安全范围之内。另外, 根据火电机组启动吹管导则, 由式(1)可以推出如下公式:

$$DF = \frac{[P_{\text{impurge}} - P_{\text{outpurge}}]}{[P_{\text{inBMCR}} - P_{\text{outBMCR}}]} \quad (2)$$

其中: P_{impurge} —吹管期间锅炉管道进口压力;

P_{outpurge} —吹管期间锅炉管道出口压力;

P_{inBMCR} —BMCR 期间锅炉管道进口压力;

P_{outBMCR} —BMCR 期间锅炉管道出口压力。

将表 2 的有关计算参数带入式(2), 可得出锅炉在表 2 工况下的 $DF = 1.57 > 1$, 符合锅炉吹管质量控制要求。这个结果为我们在该工况下, 锅炉采取稳压吹管工艺奠定了理论基础。

4 推荐的吹管流程

三井巴布科克能源公司建议吹管流程分为主系统、再热器管道、再热器系统三个阶段。采用上述流程的最大缺点是系统复杂、不经济, 耗时过长。为了提高吹管的效率, 缩短吹管工期, 在借鉴 600 MW 亚临界锅炉吹管成功经验基础上, 我们提出了采用一个回路的吹管方法, 即一次串冲一次汽及二次汽系统并中间加集粒器, 它不但在技术上可行, 而且使临冲系统的设计更为简单和经济, 缩短了整个吹管的工期。这个方法将吹管流程压缩为以下两个阶段。

4.1 主系统(第一阶段)

其流程为: 分离器→各级过热器→过热器集汽集箱→主蒸汽管道→高压主汽阀门室→临时管→临冲阀→临时管→低温再热管路(集粒器)→各级再热器→高温再热管路→中压蒸汽阀门室→临时管→消音器→排大气。

4.2 高压旁路系统(第二阶段)

其流程为: 分离器→各级过热器→过热器集汽集箱→主蒸汽管道→高压旁路管→高旁截止门→临冲门→低温再热管路→低温再热管路(集粒器)→各级再热器→高温再热管路→中压蒸汽阀门室→临时管→消音器→排大气。

5 吹管期间注意事项

在吹管期间必须注意以下 3 方面的问题:

5.1 锅炉给水品质的保证

直流锅炉对给水品质的要求比较高, 尤其是锅炉水中的铁离子含量一定不能超标。锅炉吹管期间必须严格保证给水品质合格。因此在吹管期间机组 100% 全流量的凝结水处理装置(简称 CPP)必须投用, 同时只能使用挥发性化学药品处理锅炉水, 只有这样, 才能使锅炉受热面腐蚀的危险减到最小。

5.2 分离器水位的调节

从冷炉点火到锅炉的压力和温度达到稳压吹管这段期间里, 在启动初期, 分离器水位比较稳定也比较容易控制。但是随着燃料量的增加, 炉膛热负荷逐步提高, 水冷壁下部的部分锅炉水开始变为蒸汽, 比容比水大很多的蒸汽将会造成水冷壁内部局部压力升高, 后部的水被挤压出去, 这就使锅炉出口工质流量大大超过给水流量, 从而造成分离器水位突然升高。因此, 在这段期间内应该密切监视分离器水位, 并及时调节以防止分离器满水或断水。

5.3 燃烧率的控制

在整个锅炉吹管期间, 应该始终维持油燃烧器良好的燃烧, 并注意空气预热器出口烟温的变化, 按规程投入吹灰。在具备投粉条件时, 投用磨煤机时要严格控制燃烧率的增加, 要将锅炉压力升高速度限制 0.15 MPa/min 之内。在锅炉达到稳压吹管的参数后要严密监视炉膛水冷壁、过热器和再热器金属温度, 使它们不超过相应的限制。必要时可以通过降低燃烧率, 或改变燃烧器投运层次, 调整相关的疏水和排气门开度来增加通过受热面的蒸汽流量, 降低金属温度, 以保证锅炉运行安全。

6 结束语

通过分析研究, 提出了我国首台带锅炉水循环泵启动系统的 600 MW 超临界直流锅炉吹管工艺和流程, 并在所承担的该型锅炉调试吹管过程中得到了很好的验证。整个吹管过程从 2004 年 12 月 30 日开始到 2005 年 1 月 8 日顺利结束, 历时不到 10 天, 并且在锅炉稳压吹管期间, 整个系统各段吹管系数皆大于 1, 最终靶板考核质量优良。该工艺的正确性和可行性为我国其它各型超临界锅炉的运行及基建期间的吹管工艺的设计提供了很好的参考。

参考文献:

[1] 范从振. 锅炉原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.

[2] 段永成. 国产 600 MW 超临界机组直流锅炉启动系统[J]. 热能

动力工程, 2005, 20(1): 99—100.

1999, 23(9): 34—37.

[3] 宗宏伟, 杨 莉, 刘 环. 联合循环电厂主蒸汽管道稳压吹管方法[J]. 热能动力工程, 2005, 20(2): 201—202.

[5] 李 震. 电站锅炉蒸汽吹管过程几个问题的探讨[J]. 广西电力, 2004(4): 33—35.

[4] 李永生. 锅炉吹管方式的选择及应注意的问题[J]. 中国电力,

(渠 源 编 辑)

《热能动力工程》征订启事

《热能动力工程》是学术性与技术性结合的技术刊物。本刊报导内容力求结合我国实际, 具有很强的针对性和实用性, 本刊为国内外公开发刊, 覆盖面大。本刊曾多次荣获国防科工委、中国船舶工业总公司、黑龙江省、全国优秀科技期刊奖。荣获船舶总公司科技进步三等奖。本刊还被定为国家核心期刊, 中国科学引文数据库来源期刊, 编入光盘期刊。被录入美国工程索引数据库, 并被俄罗斯文摘期刊录用。

《热能动力工程》刊载的主要内容是: 国内外蒸汽轮机、燃气轮机的研究成果及发展状况; 国内外电站及各种锅炉的设计和试验研究; 传动装置设计和试验研究; 热能工程、能源开发利用和节能技术研究与设计运行经验; 新技术转让消息和新产品介绍等。

读者对象: 热能动力工程领域的科研单位的研究人员; 大专院校的师生; 工矿企业动力部门的工程技术人员及运行、维护人员。

刊号 ISSN1001—2060 双月刊 A4 版。
CN23—1176/TK

本刊既有理论性, 也有实用性。对科研设计, 使用单位有较大参考价值, 有需要者请按下列办法办理订阅手续:

(1) 全国各地邮局均可订阅, 邮发代号 14—158; 也可向编辑部直接订阅, 每期 12 元, 全年定价 72 元。本刊还备有部分过刊, 可以订阅。

(2) 银行汇款: 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所; 开户银行: 中国银行哈尔滨市开发区支行红旗分理处。帐号: 19143628092001 邮编: 150036

(3) 邮局汇款: 150036 哈尔滨市香坊区公滨路 452 号 A 座 407《热能动力工程》编辑部

注: 汇款时注明您的详细地址, 以便我们及时邮寄收据和杂志。

increases. When a certain temperature has been reached, the chemical diffusion exergy will be greater than the physical one. **Key words:** saturator, humid air, exergy analysis, exergy efficiency

带压缩空气储能的冷热电联产系统的焓分析= **Exergy Analysis of a Cogeneration System with Compressed-air Energy Storage for the Simultaneous Supply of Electric Power, Heat and Cooling Energy**[刊, 汉] / YIN Jian-guo, FU Qin-sheng, GUO Xiao-kun, et al (College of Energy & Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 193 ~ 196

A thermodynamic exergy analysis was performed for a cogeneration system with compressed-air energy storage for the supply of electricity, heat and cooling energy. As a result, obtained were the exergy losses of various major components and the system as a whole as well as the law governing the change of exergy efficiency. The results of the analysis indicate that an increase in adiabatic efficiency of an air turbine can contribute more to an increase in system exergy efficiency than the same increase in efficiency of a compressor. When other parameters have been fixed, there exists an optimum pressure ratio, under which the exergy efficiency of the system can reach a maximum value. A high-temperature heat exchanger represents a major component causing exergy losses in a new type of cogeneration system for the simultaneous production of electricity, heat and cooling energy while the magnitude of circulating water quantity is a major factor influencing the exergy efficiency of the high-temperature heat exchanger. **Key words:** exergy analysis, compressed-air energy storage, air turbine

基于 $T-S$ 模型的锅炉蒸汽压力系统在线辨识= **Online Identification of a Boiler Steam Pressure System Based on a T-S Model**[刊, 汉] / HAO Wan-jun, CHAI Qing-xuan, HU Lin-xian, et al (College of Astronautics under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 197 ~ 200

A new method for the online identification of the main steam pressure system of a boiler from input-output data is proposed by adopting a T-S (Takagi-Sugeno) model structure. Through the use of a kind of innovative online fuzzy-clustering algorithm and an improved Kalman filter algorithm and by combining a supervised learning method with an unsupervised one online self-adaptation identification by the model has been realized. The model can conduct self-learning during operation and adapt to a very large range of operating conditions as well as the time-variation character of boiler characteristics. The results of simulation have verified the effectiveness of the model-building method put forward by the authors. **Key words:** online identification, fuzzy clustering, Takagi-Sugeno model, Kalman filter, steam pressure

国产 600 MW 机组超临界直流锅炉吹管工艺的研究= **A Study of Steam Purging Techniques for a Chinese-made 600 MW Supercritical Once-through Boiler**[刊, 汉] / GAO Sui-qiang, Huang Lei (Jiangsu Provincial Research Institute of Electric Power Testing, Nanjing, China, Post Code: 210036), WAN Xiao-yan (Nanjing Wiscom Electric Automation Co. Ltd., Nanjing, China, Post Code: 210009) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 201 ~ 204

Drawbacks and advantages of two main kinds of steam purging technique currently employed both at home and abroad for boilers, namely, pressure-reduction and stable-pressure methods, are compared and analyzed. On the first Chinese-made

600 MW supercritical once-through boiler with a recycle pump-based start-up system the feasibility of the stable-pressure steam purging technique was investigated through tests and computations with its technological procedures being designed. Moreover, some items to which due attention should be paid are discussed and explored. The present study can provide valuable reference data and information for the commissioning tests and operation of other types of supercritical boilers.

Key words: supercritical, recycle pump, once-through boiler, steam purging

薄壁不锈钢管在淡水冷却凝汽器空冷区的应用= **The Use of Thin-wall Stainless Steel Tubes in the Air-cooled**

Zone of a Fresh Water-cooled Steam Condenser[刊, 汉] / XU Gao-feng (Qinhuangdao Tonghe Thermal Power Co., Qinhuangdao, China, Post Code: 066012), MENG Jing-ming (Shanxi Sunlight Power Generation Co. Ltd., Yangquan, China, Post Code: 045200), ZHANG Yun-fei (Maintenance & Overhaul Department of Qinshan Nuclear Power Joint Operation Co., Haiyan, China, Post Code: 314300) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21 (2). — 205 ~ 207

The use of brass tubes for the air-cooled zone of a power plant steam condenser can lead to serious corrosion by ammonia, while the application of copper-nickel alloy tubes or titanium ones is associated with expensive costs. Stainless steel tubes feature good corrosion-resistant performance against ammonia. The authors have performed a contrasting analysis regarding the heat transfer performance, vibration properties, tube expanding characteristics and cost-effectiveness of thin-wall stainless steels. On this basis it is concluded that stainless tube materials when used for the air-cooled zone of a fresh-water cooled condenser have the merits of a fair operation performance and low cost, resulting in a high potential for their wide applications. **Key words:** thin-wall stainless steel, air-cooled zone, ammonia corrosion, fresh water cooled, cost-effectiveness

容器壳体大开孔补强方法的探讨= **An Exploratory Study of the Reinforcement Method Used for Large-openings on a Vessel Shell**[刊, 汉] / TAN Hong, LIN Zhi-hong, JIN Chun-nan, et al (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 208 ~ 209

Due to structural and technological requirements there arises the need to adopt a large-opening structure on a vessel shell. The stress state of such a large opening is very complicated. On the basis of different strength-failure criteria various methods for the reinforcement of shell large openings are analyzed and compared. Such methods include: equal area method, and also pressure area, extreme load, and finite element methods. The scope of applications of several reinforcement methods have been explored. With respect to the limitations of currently used reinforcement methods it is recommended that a three-dimensional finite element method-based numerical method for analyzing the reinforcement of nozzles of large openings may serve as the best method to solve the safety problem of complicated large openings of shells. **Key words:** reinforcement of large openings, equal area method, pressure area method, extreme load method, finite element method, stress analysis